

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-027529

(43)Date of publication of application : 30.01.2001

(51)Int.Cl.

G01C 19/56

G01P 9/04

(21)Application number : 11-198548

(71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 13.07.1999

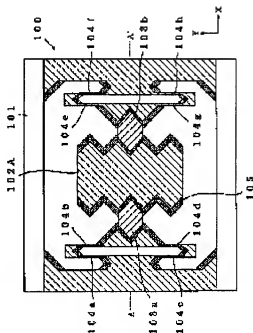
(72)Inventor : YAMASHITA MITSUHIRO

(54) ANGULAR VELOCITY SENSOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain an angular velocity sensor capable of large-amplitude drive in a low degree of vacuum.

SOLUTION: A weight 102A, beams for detection 103a and 103b, and beams for drive 104a-104h are formed in a silicon substrate 100 of a planar direction (100) through the use of anisotropic etching. Then the drive oscillation mode of an angular velocity sensor is taken in an in-plane direction in parallel with the silicon substrate 100. A side surface 105 of the weight 102 is made to be a face (111). Next, upper-part glass and lower-part glass are pasted to lower the pressure of the oscillation space of an oscillating body. For detecting an angular velocity, an electrode for drive is driven by alternating current to bring the oscillating body into resonant oscillation along the X-axis. If a rotating force occurs with the Y-axis as an axis of rotation at this time, the Coriolis's force occurs and it is detected by an electrode for detection/control. By forming edge parts of the weight 102A into a taper shape, the viscous resistance of a gas in the direction of in-plane oscillation is reduced to secure high sensitivity.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(51)Int.Cl.⁷

G 0 1 C 19/56

G 0 1 P 9/04

識別記号

F I

G 0 1 C 19/56

G 0 1 P 9/04

テーマコード(参考)

2 F 1 0 5

審査請求 未請求 請求項の数7 O L (全12頁)

(21)出願番号 特願平11-198548

(22)出願日 平成11年7月13日(1999.7.13)

(71)出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72)発明者 山下 光洋

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(74)代理人 100084364

弁理士 岡本 宜喜

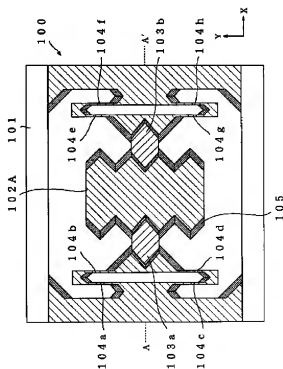
Fターム(参考) 2F105 AA02 BB04 BB13 BB14 CC04
CD03 CD05 CD13

(54)【発明の名称】 角速度センサ

(57)【要約】

【課題】 低真空度で大振幅駆動可能な角速度センサを提供すること。

【解決手段】 面方位(100)のシリコン基板100に対して、異方性エッチングを用いて、錐102A、検出用梁103a、103b、駆動用梁104a~104hを形成する。そして角速度センサの駆動振動モードをシリコン基板100に平行な面内方向にとる。錐102Aの側面105を(111)面にする。次に上部ガラス及び下部ガラスを張りつけ、振動体の振動空間を低圧にする。角速度を検出するには、駆動用電極を交流駆動し、振動体をX軸方向に共振振動させる。このときY軸を回転軸して回転力が生じると、コリオリの力が発生し、これを検出/制御用電極で検出する。錐102Aのエッジ部をテーパ状にすることにより、面内振動方向の気体の粘性抵抗が低減され、高感度になる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板と、前記基板と平行に支持された振動体と、前記振動体に対して前記基板に平行な面内で振動を励起する駆動手段と、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、前記振動体は、振動方向に対して傾斜したテーパ面を有することを特徴とする角速度センサ。

【請求項2】 周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工される基板と、

前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、

前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部と、前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧による静電気力を与える駆動用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、

前記振動体のエッジ部は、前記振動体の振動方向に対して傾斜したテーパ面を有することを特徴とする角速度センサ。

【請求項3】 前記基板の素材は、シリコンであり、前記振動体のテーパ面は、アルカリ溶剤による異方性エッチングで形成されるものであることを特徴とする請求項1記載の角速度センサ。

【請求項4】 基板と、前記基板と平行に支持された振動体と、前記振動体に対して前記基板に平行な面内で振動を励起する駆動手段と、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、前記振動体は、振動方向に対して形成された複数の溝を有することを特徴とする角速度センサ。

【請求項5】 周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工される基板と、

前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、

前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部と、

前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ

部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧による静電気力を与える駆動用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、

前記振動体は、前記振動体の上下面の少なくとも一方に前記振動体の振動方向と平行な成分を持つ複数の溝が形成されたことを特徴とする角速度センサ。

【請求項6】 前記基板の素材は、シリコンであり、前記振動体の溝は、アルカリ溶剤による異方性エッチング又は反応性イオンエッチングで形成されるものであることを特徴とする請求項4記載の角速度センサ。

【請求項7】 周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工されるエッチング加工可能な基板と、

前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、

前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部と、

前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧より静電気力を与える駆動用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、

前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、

前記基板の素材は、シリコンであり、前記駆動用梁部は、前記シリコンのエッチングにより形成され、前記基板面と直角方向に板状部材を環状に結合した板ばねから構成されることを特徴とする角速度センサ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、例えば車両の姿勢制御、進行方位の算出などに用いられる角速度センサに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 従来、角速度を検出するセンサとして様々なジャイロスコープ（以下、ジャイロという）が開発されている。その種類は大体に機械式のコマジャイロ、流体式のガスレートジャイロ、音片・音叉の振動を

用いる振動ジャイロ、光学式的光ファイバジャイロとリングレーザージャイロ等に分類される。光学式のジャイロはサニャック効果、それ以外のものは回転体の角運動量保存則の現象であるコリオリ力を用いて角速度の検出を行っている。使用用途により、精度、価格、寸法等が勘案され、実際に使用されるセンサが選択されている。

【0003】上記振動ジャイロ式の角速度センサとしては、例えば特開昭61-77712号公報に開示されているものがある。図9はこの従来の振動ジャイロ式の角速度センサの基本構造図であり、検出用素子901、902、励振用素子903、904を有している。各々の素子は例えば圧電バイモルフにより構成されており、励振用素子と検出用素子が二組で音叉を形成する。角速度は、音叉の根元に近い励振用素子903、904に交流電圧を加えて検出用素子901、902を屈曲振動させ、検出用素子901、902の面に垂直に加わるコリオリ力を圧電効果を用いて検出する方式となっている。

【0004】更に近年は、単結晶シリコンや水晶などの素材にマイクロマシンング微細加工技術を適用して形成した超小型な角速度センサの開発も進められている。例えば、P.Greiff他により発表された論文(Silicon monolithic micromechanical gyroscope, Transducers'91, p.966 ~969)にその一例が記載されている。また、例えば特開平5-312576号公報「角速度センサ」にその例が記載されている。

【0005】角速度センサは、自動車用途としてはシヤシー系の制御とか、ナビゲーションシステムの方位算出等に用いられる。検出されるのはヨー、ロール、ピッチと三種類ある車体の回転運動の中で、特にヨー方向(鉛直線を中心とする大地に水平な面内での回転)の角速度、即ちヨーレートであることが多い。検出目的は、例えば4輪操舵(4WS)の様なシヤシー制御の場合には、ヨーレートを車面の姿勢情報の一つとして制御システム側にフィードバックすることにより、姿勢制御性能を向上させるためである。またナビゲーションシステム用の場合には、ヨーレートを時間積分することによって車面の旋回角度を算出することにある。なお、通常車載用として使用される角速度センサは、廉価版の圧電振動ジャイロを用いたものが多い。また、光ジャイロは高精度車載用センサとして実用化された例がある。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】車載用途を始めとする各種機器に搭載するには、電子部品の小型化が常に求められており、そのため角速度センサにおいては、マイクロマシンング微細加工技術を適用することが試みられてきた。しかし、マイクロマシン振動ジャイロの場合、音叉又は音叉からなる振動体を大振幅で駆動することが必要となる。この場合、常圧(大気圧)では気体の粘性抵抗のため十分な振幅がとれず、駆動振幅に比例するコリオリ力が小さくなり、感度が低下する。このため、実際

には減圧雰囲気で角速度センサを使用する必要があるという課題を有していた。

【0007】本発明は、このような従来の問題点に鑑み、てなされたものであって、高真空度に保持することなく、安定して大振幅駆動を行うことのできる角速度センサを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】本願の請求項1の発明は、基板と、前記基板と平行に支持された振動体と、前記振動体に対して前記基板に平行な面内で振動を励起する駆動手段と、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、前記振動体は、振動方向に対して傾斜したテーパー面を有することを特徴とするものである。

【0009】本願の請求項2の発明は、周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工される基板と、前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部と、前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧による静電気力を与える駆動用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出用電極と、を具備し、前記振動体のエッジ部は、前記振動体の振動方向に対して傾斜したテーパー面を有することを特徴とするものである。

【0010】本願の請求項3の発明は、請求項1の角速度センサにおいて、前記基板の素材は、シリコンであり、前記振動体のテーパー面は、アルカリ溶剤による異方性エッチングで形成されることを特徴とするものである。

【0011】本願の請求項4の発明は、基板と、前記基板と平行に支持された振動体と、前記振動体に対して前記基板に平行な面内で振動を励起する駆動手段と、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段と、を具備し、前記振動体は、振動方向に対して形成された複数の溝を有することを特徴とするものである。

【0012】本願の請求項5の発明は、周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工される基板と、前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部

と、前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧による静電気力を与える駆動用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出用電極と、を具備し、前記振動体は、前記振動体の上下面の少なくとも一方に前記振動体の振動方向と平行な成分を持つ複数の溝が形成されたことを特徴とするものである。

【0013】本願の請求項6の発明は、請求項4の角速度センサにおいて、前記基板の素材は、シリコンであり、前記振動体の溝は、アルカリ溶剤による異方性エッチング又は反応性イオンエッチングで形成されることを特徴とするものである。

【0014】本願の請求項7の発明は、周辺部、中央部、及び前記周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工されるエッチング加工可能な基板と、前記基板の中央部に形成されて前記基板面と平行な方向に振動自在となる振動体と、前記基板の支持部に形成され、前記振動体を前記基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部と、前記基板の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう前記基板の周辺部に固着された上下の電極用基板と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体に駆動電圧より静電気力を与える駆動用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、前記振動体の振動変位を検出するモニタ用電極と、前記上下の電極用基板に形成され、前記振動体の上下面と対向する位置に設けられ、前記振動体に加わるコリオリ力を検出する検出用電極と、を具備し、前記基板の素材は、シリコンであり、前記駆動用梁部は、前記シリコンのエッチングにより形成され、前記基板面と直交方向に板状部材を環状に結合した板ばねから構成されることを特徴とするものである。

【0015】このような構成によれば、角速度センサの駆動振動モードとして基板面内の振動を選択し、かつ振動体の側面の形状をテーパ状にし、振動体の表面に溝を形成することで、振動に対する気体の粘性抵抗を低下させることができる。この、低真空中での振動体の共振利得を低下させることなく駆動することが可能になる。

【0016】また、駆動用梁部を板ばね状にしたため、不要な振動モードを増やすことなく、大振幅駆動時の共振特性の非線形化を防ぎ、高いQ値を維持したまま駆動することが可能になる。

【0017】

【発明の実施の形態】（実施の形態1）本発明の実施の形態1における角速度センサについて図面を参照しながら説明する。図1は本実施の形態における角速度センサの構造を示すX-Y平面図である。この角速度センサは、駆動振動を基板面、即ちX-Y平面と平行にとり、かつ振動体の駆動方向の側面を斜面（テーパ面）で形成する。そして側面の中央部を凸とするテーパ面とすることにより、駆動振動の粘性抵抗を低減したことを特徴とするものである。

【0018】この角速度センサは単結晶のシリコン（Si）基板100に形成される。本例では、単結晶のシリコン基板100は、その面方位が（100）であり、n形不純物の濃度が高く、抵抗率が低く、エッチング可能なn⁺基板とする。基板100は、その周辺部、中央部、周辺部と中央部を弾性的に結合する支持部を残してエッチング加工する。このとき中央部に形成されて基板面と平行な方向に振動自在となる錐102Aを角速度センサの振動体とする。そして基板100の支持部に形成され、振動体を基板面と平行方向に弾性的に保持する駆動用梁部を複合梁104とする。

【0019】このように角速度センサの主要部となる振動体は、フレーム101に対して1個の錐102Aを1対（2本）の複合梁104で支持する構造となっている。この振動体は、シリコン基板100をKOH（水酸化カリウム）、TMAH（水酸化テトラメチルアンモニウム、 $(CH_3)_4NOH$ ）等のエッチング溶液中で結晶異方性エッチングすることにより形成される。

【0020】ここでフレーム101及び錐102Aは、基板面に平行な（100）面を主面として構成されている。また検出用梁103a、103bは錐102Aを支える梁であり、主面及び側面とも（100）面で、主面がシリコン基板100と平行な面からなる板ばねとなっている。この検出用梁103は、計8本の駆動用梁104a～104hを介して固定端から弾性的に支持されている。これらの駆動用梁は、基板面と直交な板面を有する板状部材で構成される。即ち、駆動用梁104aの主面及び側面とも（100）面で構成された板ばね構造であるが、主面がシリコン基板100と垂直な面で、<100>方向に構成されている点が検出用梁103と異なる。

【0021】基板100の上面及び下面と一定の空隙を介して平行になるよう、基板100の周辺部に上下の電極用基板を固着させる。図2（a）～（c）はシリコン基板100と、上側の電極用基板である上部ガラス111と、下側の電極用基板である下部ガラス121とを、X軸を揃えて示した分解平面図である。上下の電極用基板はシリコン基板100に対して陽極接合で固着される。上部ガラス111及び下部ガラス121には、シリコンと熱膨張率が非常に近いガラス、例えばコーニング

社のホウケイ酸ガラスであるパイレックス#7740が用いられる。図2(a)に示す電極112~114、及び図2(c)に示す電極122~124は、上部ガラス111の下面、及び下部ガラス121の上面に、例えば真空蒸着法又はスパッタ法等PVD (physical vapor deposition, 物理気相堆積) の手法で形成したPt/TiまたはAu/Cr等からなる電極である。これらの電極は、錘102Aと対をなし、コンデンサを形成する。【0022】図3は本実施の形態による角速度センサを圖1のA-A'線で切断した際のX-X断面図である。この断面図に示すように、検出/制御用電極113、123は錘102Aの中央部を挟み込むように形成され、その左右に駆動用電極112、122、及びモニタ用電極114、124が形成されている。図2(a)に示す電極115はGND用である。駆動用電極112、122は、振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、振動体に駆動電圧による付勢力を与える駆動手段である。モニタ用電極114、124は、振動体のエッジ部と対向する位置に設けられ、振動体の振動変位を検出する電極である。検出/制御用電極113、123は、振動体の上下面と対向する位置に設けられ、振動体に加わるコリオリ力を検出する検出手段(検出用電極)の機能を有している。

【0023】以上のような構造の角速度センサの製作プロセスについて簡単に説明する。まず、シリコンプロセスでは、シリコンエッチング用マスクである酸化膜又は窒化膜の形成と、フォトリソグラフィ技術を用いた多層マスクの形成という2つの技術の組合せで振動体を形成する。なお本実施の形態では、シリコン基板のエッチングにはドライエッチングではなく、ウェットエッチングを採用するものとし、エッチング溶液にはKOH又はTMAHを用いるものとする。そのため、シリコン基板のウェットエッチングによる振動体の形成時には、検出用梁103の側面及び駆動用梁104の主面がSi面(100)上の<100>方向に形成されているため、(100)面が現れる。

【0024】一方、錘102Aの側面105は、Si(100)面上の<110>方向に形成されるため、シリコン基板100と54.74°だけ傾いた(111)面がテーパー面となって現れる。なお、図1は振動体が形成された後の概略図であるが、振動体の各凸部におけるオーバーエッチングについては図示を省略している。また、酸化膜(窒化膜)のマスク形状の設計には、予め最終的なシリコンのエッチング量とシリコン基板100の厚さ、所望の駆動用梁104の厚さを勘案して寸法を決定する必要がある。ガラス上の電極と振動体からなるコンデンサのギャップ形成には、ガラス面をエッチングする手法もあるが、本実施の形態ではシリコン基板100をエッチングする手法を採用した。図3に示すエッチング深さ d_0 は、例えば両面とも2~5 μm とすれば良

い。

【0025】次に、ガラスプロセスについて説明する。上部ガラス111及び下部ガラス121は、前述したようにシリコンと熱膨張率が非常に近いガラス、例えばパイレックス#7740を用いる。そして、少なくともシリコン基板100に接する面は鏡面研磨されているものとし、本実施の形態では1mmの厚さとした。ガラス基板上の電極としては、例えばTiとPtを電子ビーム蒸着しても良いし、ITOの様な透明電極をスパッタで形成しても良い。また、2種類以上の組成の金属材料を場所により使い分けても何ら問題ない。

【0026】ガラス基板上には3種類の電極を形成する。本実施の形態では、電極112、122が駆動用、電極113、123が検出及び制御用、電極114、124がモニタ用の電極とする。なお図3に示すように、駆動用電極112、122と、モニタ電極114、124は、駆動用梁104と平行な錘102Aの端部上下のガラス面に各々対をなして形成するが、検出/制御用電極113、123は錘102Aの主面上に独立して形成する。

【0027】以上のプロセスにより、図2に示したシリコン基板100、上部ガラス111、下部ガラス121の各部品加工は終了する。次に組立プロセスに移行する。まず、最初に上部ガラス111とシリコン基板100を陽極接合し、その後、シリコン基板100に対して下部ガラス121を陰極接合し、振動体を形成する。陽極接合は、真空中でシリコン基板及びガラスを例えば300~400℃で加熱し、シリコン基板を基準電位としてガラス側に300~1,000V程度の負電圧を印加することで行う。最後に、ガラス基板上の各電極と外部信号処理回路を金線等で接続して配線を完了する。以上が角速度センサの組立プロセスである。

【0028】以上のように構成された本実施の形態の角速度センサの動作原理について以下に説明する。尚説明の都合上、図1に示すようにシリコン基板100がXY平面内にあり、駆動用梁104がY軸方向に平行に設置されているものとする。

【0029】まず、2枚の駆動電極112、122にシリコン基板100を接地基準として絶対値の等しい電圧を印加する。この場合、シリコン基板面100に垂直なZ軸方向の力は相殺されて0になる。しかし、電極面に平行で検出用梁103の接続された錘102Aの側面に垂直な方向、即ちX軸方向に静電気力が発生する。ただし、ここでは2枚の電極面積が等しく、かつコンデンサの電極間隔、即ち錘102Aと電極112、122間の距離が等しいと仮定する。このときシリコン振動体とガラス面との平行なX軸方向に発生する力を F_d とし、2枚の電極と錘102Aが形成するコンデンサのエネルギーを U_d 、2枚の電極の静電容量を C_d とすれば、 F_d は次の(1)式で与えられる。

【数 1】

$$F_d = -\frac{\partial U_d}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{Q_d^2}{C_d^2} \frac{\partial C_d}{\partial x} = \frac{\varepsilon l_w V_d^2}{d_0} \quad \text{----- (1)}$$

(1) 式において、 Q_d はコンデンサに保持された電荷、 l_w は駆動方向に垂直な電極の幅、 d_0 はコンデンサの電極間隔、 V_d は印加電圧である。ここでは、コンデンサの電極間隔 d_0 は、2枚のガラス上に形成された電極相互の間隔よりも十分小さいという近似を適用している。

【0030】(1) 式より2枚の駆動電極で発生するX軸方向の静電気力 F_d の大きさは、駆動方向に垂直な電極幅 l_w に比例し、かつコンデンサの電極間隔 d_0 に反比例し、印加電圧 V_d の2乗に比例することが判る。

【0031】鍾102AのX軸方向の駆動には上記の静電気力 F_d を用いる。静的な鍾102Aの変位量 Δx は、駆動用梁104のX軸方向のばね定数 k_d が決まれば、フックの法則により $\Delta x = F_d / k_d$ で求められ、この値は非常に小さな値となるが、駆動方向の振動

周波数を振動体の共振周波数に一致させることで、動的にはQファクター倍した変位量 Δx を得ることができる。特に、本実施の形態の様に単結晶シリコンで振動体をエッチング加工した場合には、振動体のエッジ部にデーパー面が形成されているため、空気抵抗が少なくなる。このため内部損失が非常に小さくなり、数万程度の大きなQファクターを得ることが可能である。結果として大きな振動幅、例えば20 μ m程度の振幅を得ることができる。

【0032】所望の振動周波数で振動体を駆動するには、例えば駆動用電極112、122に所望の共振周波数 ω の交流電圧 V_{ac} と、直流電圧 V_{dc} とを重ねて印加すれば良い。この場合、(1) 式より $F_d \propto V_d^2$ の関係があるが、次の(2) 式が成立する。

【数 2】

$$\begin{aligned} V_d^2 &= (V_{dc} + V_{ac} \cos \omega t)^2 \\ &= V_{dc}^2 + \frac{V_{ac}^2}{2} + 2 V_{dc} V_{ac} \cos \omega t + \frac{V_{ac}^2}{2} \cos 2\omega t \\ &= V_{dc}^2 + 2 V_{dc} V_{ac} \cos \omega t \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

(但し、 $V_{ac} \gg V_{dc}$)
ここで $V_{ac} \gg V_{dc}$ の関係式が成立するよう、各値を設定することにより、印加電圧と同じ周波数の駆動力を得ることができる。以上のように、駆動用電極112、122に交流電圧 V_{ac} と直流電圧 V_{dc} とを重ねて印加することで、電極面に平行な方向の大きな振動を励起することができる。

【0033】このようなシリコン振動体を角速度センサに用いる場合には、最終的な角速度の検出感度を一定とするために、駆動振幅を一定に保つ必要がある。モニタ用電極114、124は、その駆動振幅を検出するために設けられた電極である。駆動用電極112、122に駆動電圧が印加され、鍾102AがX軸方向に駆動されれば、駆動用電極112、122と鍾102Aの重なり部分の面積と同期してモニタ用コンデンサの面積が変動する。この駆動振動に同期したコンデンサ容量の変化をモニタ用電極114、124により検出し、容量変化のAC成分が一定になるように駆動電圧にフィードバックをかけることで、振動体の駆動振幅を一定に保つことが

できる。

【0034】以上の駆動方法は他励共振させる場合であるが、交流電圧 V_{ac} を印加する代わりに、一巡ループを形成し、自励共振を行わせることも可能である。一般に、バルクハウゼンの発振条件、即ちループ利得が1かつループ一巡の位相変化が360°の整数倍を満足したとき発振する。このため、直流電圧 V_{dc} だけを印加し、ループの利得と位相変化を調整すれば、それだけで所望の振動モードで共振を励起することができる。この場合も、例えば非線形抵抗としての機能を乗算器等を用いて実現すれば、振動体の駆動振幅を一定に保つことができる。

【0035】最終的な角速度の検出は、以下のようにして行う。X軸方向に励振された鍾102AがY軸回りに角速度 Ω で回転すれば、鍾102Aには(3) 式で示されるコリオリ力 F_c が作用する。

【数 3】

$$\vec{F}_c = 2m \times \vec{v} \times \vec{\Omega} \quad \text{----- (3)}$$

尚、(3) 式の m は振動体の実効質量とし、 v は振動体のX方向の運動速度とする。

【0036】コリオリ力は回転体の角運動量保存則の表れと考えられるが、その大きさは(3) 式にも示された

通し、錫102Aの運動速度 v と角速度 Ω の外積に比例したものとなる。即ち、回転軸がY軸の場合、コリオリ力 F_c はZ軸方向に発生する。よって、振動体である錫102Aと検出/制御電極113又は123とで形成されるコンデンサの容量変化、即ちコリオリ力による容量変化を検出することで、角速度 Ω を求めることができる。

【0037】振動体の実効質量 m は比較的小さいため、(3)式で示されるコリオリ力 F_c も静的には小さい値となる。しかし、錫102AのX軸方向の屈曲振動である駆動振動と、錫102AのZ軸方向の屈曲振動である検出振動との共振周波数を十分近づければ、駆動振動における動的Qファクターに加え、検出振動においても動的効果を得られる。こうすると、検出感度を確保することができる。なお、共振周波数を十分近づけるためには、有限要素法を用いて振動体の共振周波数の計算機シミュレーション(モーダル解析)を行い、各寸法を調整すれば良い。

【0038】ところで、前述した容量変化はC-V変換器で電圧変化(交流電圧)に変換して検出する。C-V変換器としては、例えば前中他により論文(Silicon resonator using anisotropic etching technology, Transducers' 93, p. 642~p. 645)に示されているように、入力インピーダンスの高いJ-FETをソースフォロワとしてセルフバイアス方式で用いれば良い。また、一方の検出/制御電極113が形成するコンデンサと、他方の検出/制御電極電極123が形成するコンデンサの容量変化は、位相が互いに反転している。よって、C-V変換した後で差動増幅することで、全コンデンサの容量変化を電圧変化として検出することができる。これらの手法を用いることで、振動体に働くコリオリ力により発生する錫102の変位から、角速度 Ω を検出することができる。

【0039】なお、以上の説明では錫102Aの動的変位量から角速度を算出したが、サーボ技術を用いることで、更に高感度に角速度を検出することも可能である。サーボ技術を適用する場合には、錫102Aに働くコリオリ力 F_c を打ち消す方向に一部の検出/制御電極を用いて力 F_c を加えれば良い。制御方式としては、例えばPWM方式を用いても良いし、またその他の方式を用いても構わない。

【0040】以上のように、実施の形態1では、面方位(100)の単結晶シリコン基板を異方性エッチング加工することによって、基板面内での駆動振動モードを持ち、駆動振動方向の錫の側面が基板と垂直でなく54.74°の傾きを持つ(111)面で形成された角速度センサを実現できた。

【0041】ところで、一般にコリオリの力を大きくするには、(3)式から明らかなように、駆動振幅を十分大きくしなければならない。数10 μ mに及ぶ駆動振幅

を実現するには、共振特性のQファクターを十分大きくする必要があるが、Qファクターは振動体の外部雰囲気(気圧)に大きく影響を受ける。特に、平行平板で挟みギャップを形成したような構造では、基板に平行な面内での振動モードと、垂直な面内での振動モードとは、ダンピングの影響が大きく異なる。面内での振動モードの方は、1桁から2桁程度低い真空度でも高いQファクターを維持できる。但しその場合でも、十分な駆動振幅を得るには、例えば数Torrから数十Torr程度まで振動体の外部雰囲気(気圧)を下げる必要がある。

【0042】本実施の形態では、Qファクター維持に有利なように、シリコン基板に平行な面内での振動モードを採用しただけでなく、駆動振動方向の振動体側面の大部分を(111)面からなる斜面で構成し、駆動振動における気体の粘性抵抗を極力低下させている。このため、更に角速度センサ内の気圧を大気圧に近づけても、十分なQファクターを維持することができ、結果として低真空度での大振幅動作が可能な角速度センサを実現することができる。

【0043】なお、本実施の形態では、駆動振動モードとしてシリコン基板に平行な面内でのX軸に沿った直線的な往復振動を採用した場合について述べたが、これは同じシリコン基板面内での振動モードであれば、Z軸を回転軸とする回転振動モードを駆動振動モードとしても結果は同様である。更に本実施の形態では、面方位(100)のシリコン基板を結晶異方性エッチング加工して駆動側面の斜面形成を行ったが、当然(110)面のように、他の面方位をもつシリコン基板であっても良いし、斜面も(111)面である必要はなく他の方位を持つ面でも良い。またシリコン基板のドーパントは、P型であっても何ら問題はない。

【0044】(実施の形態2)次に、本発明の実施の形態2における角速度センサについて説明する。本実施の形態の角速度センサは、実施の形態1と同様に駆動振動をシリコン基板と平行な面にとり、かつシリコン基板面と平行な振動体の面上に溝を形成して、駆動振動の粘性抵抗を低減したことを特徴とするものである。図4は本実施の形態における角速度センサの構成を示すX-Y平面図であり、実施の形態1と同一部分は同一の符号を付け、詳細な説明は省略する。

【0045】図4に示すように、角速度センサの基本的構成は図1に示すものとほぼ同じであるが、シリコン振動体の主要部である錫102Bの形状が異なっている。図4において、シリコン基板100は面方位(100)の単結晶シリコン基板であり、実施の形態1と同様にn形不純物の濃度が高く、抵抗率が低いn⁺基板とする。この振動体は1個の錫102Bを1対(2本)の複合梁で支持する構造となっている。この振動体はシリコン基板100をKOH及びTMAH等のアルカリエッチング溶液中で結晶異方性エッチングすることにより形成され

る。

【0046】 鍾102Bは、シリコン基板100の面に平行な(100)面を主面として構成されている。検出用梁103a、103bは鍾102Bを支える梁であり、主面及び側面とも(100)面で主面がシリコン基板100と平行な面からなる板ばねとなっている。この検出用梁103は、各々4本(合計8本)の駆動用梁104a~104hを介して固定端から支持されている。なお、駆動用梁104は主面及び側面とも(100)面で構成された板ばね構造であるが、主面がシリコン基板100と垂直な面で、<100>方向に構成されている点が検出用梁103と異なる。

【0047】 実施の形態1との差異は、鍾102Bの駆動方向の側面が(100)面で構成されていること、鍾102の主面上に複数の溝106Bが振動方向であるX軸方向に形成されていることである。図4のB-B'線に沿って切斷したZ-Y断面図を図5に示す。この断面図に示すように、溝106Bは側面及び底面とも(100)面で形成されており、駆動振動方向に平行に形成されることになる。ガラス基板及びシリコンプロセス、更に振動体の駆動方法及び角速度の検出原理は、実施の形態1とほぼ同様であるので、それらの説明を省略する。

【0048】 以上のように、本実施の形態では、面方位(100)の単結晶のシリコン基板100を異方性エッチング加工することによって、基板面内での駆動振動モードを持ち、かつ振動体の主面上に駆動振動方向に沿った溝を形成した角速度センサを形成できる。その結果、Qファクターの維持に有利なように、シリコン基板に平行な面内での振動モードを採用し、駆動振動方向の振動体の投影断面積を減らすことができる。また極端に狭い間隔の領域を減らすことで、駆動振動に対する気体の粘性抵抗を極力低下させることができる。そのため、角速度センサ内の気圧を大気圧に近づけても、十分なQファクターを維持することができる。結果として低真空度での大振幅動作が可能な角速度センサを実現することができる。

【0049】 なお、本実施の形態では、実施の形態1と同様、駆動振動モードとしてシリコン基板に平行な面内でのX軸に沿った直線的な往復振動を採用した場合について述べた。これは同じ基板面内での振動モードであれば、Z軸を回転軸とする回転振動モードを駆動振動モードとしても結果は同様である。さらに、溝106Bとして(100)面による四溝を採用したが、(111)面によるV溝としても良い。その場合には、図4の鍾102B上で溝がX軸(Y軸)と45°傾いた形で形成される。また、本実施の形態では面方位(100)のシリコン基板を異方性エッチング加工して駆動側面の斜面形成を行ったが、当然(110)面のうに、他の面方位をもつシリコン基板であっても良いし、斜面も(111)

面である必要はない。

【0050】 (実施の形態3) 次に、本発明の実施の形態3における角速度センサについて説明する。本実施の形態の角速度センサは、駆動振動をシリコン基板と平行な面にとり、かつ振動体の主面及び側面を加工して、駆動振動の粘性抵抗を低減したことを特徴とするものである。図6は本実施の形態における角速度センサの構造を示すX-Y平面図であり、実施の形態1、2と同一部分は同一の符号を付け、詳細な説明は省略する。

【0051】 角速度センサの基本的構成は実施の形態1とほぼ同じであるが、シリコン振動体の形状が実施の形態1、2のものとは異なっている。図6において、シリコン基板100は面方位(100)の単結晶のシリコン基板であり、実施の形態1と同様にn形不純物の濃度が高く、抵抗率が低いp⁺基板とする。角速度センサの主要部となる振動体は、1個の鍾102Cを2対(2本)の複合梁で支持する構成となっている。この振動体は、アルカリエッチング溶液中での結晶異方性エッチングと、プラズマ中での反応性イオンエッチング(RIE)を併用して形成される。

【0052】 鍾102Cはシリコン基板100の面に平行な(100)面を主面として構成されている。検出用梁103a、bは鍾102Cを支える梁であり、主に結晶異方性エッチング加工で形成される。この検出用梁103は、各々2本(合計4本)の駆動用梁104a~104dを介して固定端から支持されている。なお、駆動用梁104はRIEで構成された板ばね構造である点が検出用梁103と異なる。その他の主要な差異は、鍾102Bの駆動方向の側面が(111)面で構成されていること、鍾102の主面上に駆動方向に平行なV形の溝106Cが形成されていることである。

【0053】 図6のA-A'線に沿って切斷したZ-X断面図を図7(a)に示し、図6のB-B'線に沿って切斷したZ-Y断面図を図7(b)に示す。これらの断面図で示すように、最初にシリコン基板100の異方性エッチングを上面からのみ実施し、その後で下面からRIEを用いて貫通エッチング加工を行う。その他のプロセス及び駆動原理は実施の形態1、2と同様であるので、それらの説明を省略する。

【0054】 以上のように本実施の形態では、面方位(100)のシリコン基板100に結晶異方性エッチング加工とRIEを併用することによって、基板面内での駆動振動モードを採用し、振動体の主面上に駆動振動方向に沿った溝を形成し、また側面はシリコン基板100と傾きを持つ(111)面から構成される角速度センサを形成できる。その結果、実施の形態1、2と同様に、Qファクターの維持に有利となるよう、シリコン基板に平行な面内での振動モードを採用し、駆動振動方向の振動体の投影断面積を減らすことができる。また極端に狭い間隔の領域を減らすことで、駆動振動に対する気体の

粘性抵抗を極力低下させることができる。そのため、角速度センサ内の気圧を大気圧に近づけても、十分なQファクターを維持することができ、結果として低真空度での大振幅振動が可能な角速度センサを実現することができる。

【0055】なお、本実施の形態では、実施の形態1、2と同様に、駆動振動モードとしてシリコン基板に平行な面内でのX軸に沿った直線的な往復振動を採用した場合について述べたが、これは同じ基板面内での振動モードであれば、Z軸を回転軸とする回転振動モードを駆動振動モードとしても、結果は同様である。またRIEを採用すれば、振動体の平面的な設計自由度は大きくなり、基板面内振動モードを用いた振動体として様々な構成を採ることができる。更に、振動体主面上の溝をRIEで形成してもなんら問題ない。

【0056】また、実施の形態1～3では、ウェットエッチング及びRIEを用いて基板面に垂直な板ばねを組合せ、環状の梁として駆動用梁を形成した。この駆動用梁の形状は、板面を図8(a)に示す箱状にしても良く、(b)に示すように板面と環状に結合した楕円状に形成しても良い。また、この形状を直列に接続する形でも良い。このように、駆動方向に十分な弾性を持った梁を構成することで、大振幅駆動時にも共振特性の非線形化を抑制することが可能になり、高いQ値を維持したまま駆動振動を励起することが可能になる。また、このように板ばねを環状に構成した場合、図8(c)に示すように、2つの梁に分離する場合と比較して、可動に関する自由度が減少し、不要な振動モードを必要以上に増やさないという利点も得られる。

【0057】更に、実施の形態1～3では、ガラス-シリコン-ガラスの三層構成の平行平板静電駆動容量検出型のマイクロマシン振動ジャイロについて述べたが、シリコン基板面内での振動モードを採用するならば、楕円形静電駆動容量検出型でも良いし、基板の上に磁石を設置し、振動体に電流路を形成してローレンツ力で面内振動を誘起するような電磁駆動方式でも良い。また、圧電駆動方式でもなんら問題はない。さらに、三層構成でなくても問題はなく、ガラス-シリコン、シリコン-シリコンの二層構成であっても効果は同様である。

【0058】

【発明の効果】以上のように本発明によれば、振動型の角速度センサにおいて、共振特性を非線形化することな

く、大振幅で駆動させることができる。また低真空度においても気体の粘性抵抗を低減し、共振特性のQ値を著しく低下させることなく駆動振幅を維持することができる。その結果、駆動振幅に比例するコリオリ力を高感度で検出できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態1による角速度センサにおいて、振動体の構成を示す平面図である。

【図2】実施の形態1の角速度センサにおいて、上部ガラス、振動体、下部ガラスの位置関係を示す分解平面図である。

【図3】実施の形態1による角速度センサにおいて、振動体の構成を示す断面図である。

【図4】本発明の実施の形態2による角速度センサにおいて、振動体の構成を示す平面図である。

【図5】実施の形態2による角速度センサにおいて、振動体の構成を示す断面図である。

【図6】本発明の実施の形態3による角速度センサにおいて、振動体の構成を示す平面図である。

【図7】実施の形態3による角速度センサにおいて、振動体の構成を示すZ-X断面図及びZ-Y断面図である。

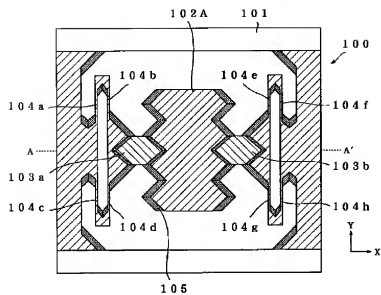
【図8】本発明の実施の形態1～3の角速度センサに用いられる駆動用梁の菱形例を示す構造図である。

【図9】従来例の音叉形振動ジャイロを用いた振動体の概略構成図である。

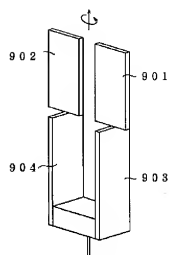
【符号の説明】

- 100 シリコン基板
- 101 フレーム
- 102, 102A, 102B, 102C 鋸
- 103a, 103b 検出用梁
- 104a, 104b, 104c, 104d, 104e, 104f, 104g, 104h 駆動用梁
- 105 鋸の側面
- 106, 106B, 106C 溝
- 111 上部ガラス
- 112, 122 駆動用電極
- 113, 123 検出/制御用電極
- 114, 124 モニタ用電極
- 121 下部ガラス
- 901, 902 検出用素子
- 903, 904 励振用素子

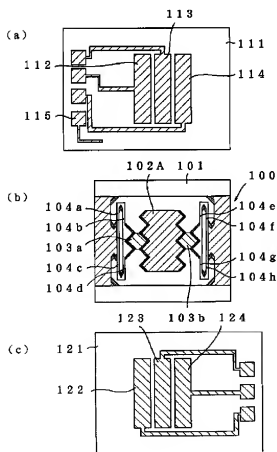
【図1】



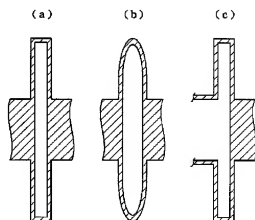
【図9】



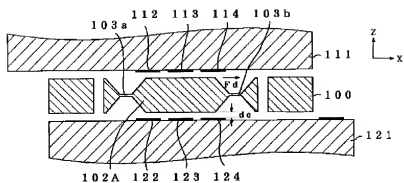
【図2】



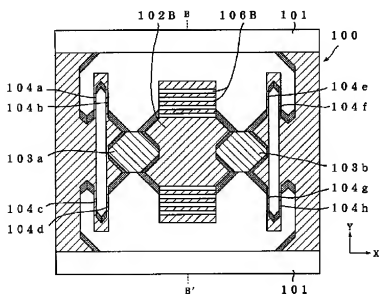
【図8】



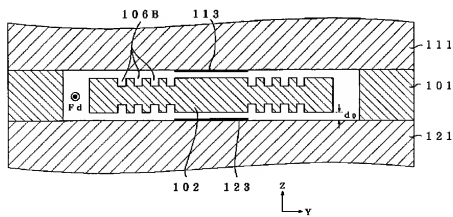
【図3】



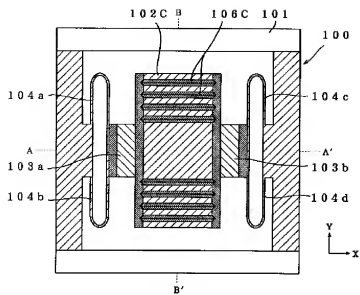
【図4】



【図5】



【図6】



【図7】

